



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Praxisgerichtete Forschung am Beispiel der Bahndehnungsmessung

Scheuter, Karl R.

(1981)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00014111>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Report

Division: 16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14111>

Praxisgerichtete Forschung am Beispiel der Bahndehnungsmessung

Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter

Von einer Rollenrotationsmaschine erwartet man als primäre Qualitätsforderung einen passerhaltigen Druck. Es ergibt sich damit die Frage nach den Grundvoraussetzungen, welche erfüllt werden müssen, um diese Forderung zu erfüllen.

Um diese Grundvoraussetzungen abzuleiten, betrachten wir in Gedanken eine laufende Rollenrotationsmaschine, welche im Zeitpunkt der Betrachtung passerhaltig drucken möge, und fragen nach der ausreichenden Bedingung, die erfüllt sein muß, damit auch beim Fortdruck in alle Zukunft der Passer stehen bleibt. Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir erkennen, daß hier ein System vorliegt, das nicht nur die Druckmaschine enthält, sondern auch den Bedruckstoff, die Druckfarbe und andere Betriebsstoffe, z.B. Feuchtwasser.

Die einfachste Antwort auf die eben gestellte Frage lautet natürlich: Es darf sich nichts ändern, d.h. das System muß stationär sein. Diese simple Antwort, so richtig sie auch sein mag, muß natürlich auf ihre Bedeutung für die einzelnen Systemkomponenten analysiert werden, denn sicher gibt es Eigenschaften von Komponenten, welche sich wohl ändern dürfen, ohne den Passer zu beeinflussen.

Betrachten wir einmal die Druckmaschine. Wir wissen alle, daß diese Systemkomponente, sobald sie ihre Betriebstemperatur erreicht hat, z.B. ihre Geometrie praktisch nicht mehr verändert. Gleichfalls ist es zu behaupten erlaubt, daß alle Geschwindigkeiten sich bewegender Maschinenteile im Fortdruck praktisch konstant, bzw. im Falle periodischer Bewegungen quasi-konstant sind. Die Druckmaschine erfüllt - die Praxis bestätigt dies in der Regel - die Forderung, sich im Fortdruck nicht zu verändern.

Betrachten wir nun die Druckfarbe. Auch diese darf im Fortdruck als Systemkonstante betrachtet werden, und dies gilt beim Offsetdruck auch für das Feuchtmittel. Jede Änderung dieser Systemkomponenten würde ja Einfärbefehle ergeben.

Wir kommen nun zum Papier. Dies ist ein Stoff, der von Natur aus schwach viskoelastisch ist, bei dem also bei Deformation innere Reibung auftritt und der bei Dehnungen, die merklich über 2 % liegen, auch fließt. Beim Lauf durch die Druckmaschine treten jedoch selten Dehnungen auf, die 1 % wesentlich überschreiten. Das Papier darf deshalb als ein elastischer Stoff betrachtet werden, bei dem nach dem Hooke'schen Ansatz der Elastizitätsmodul E als kennzeichnende Materialgröße die Spannung σ und die Dehnung ϵ verknüpft. Es gilt also mit sehr guter Näherung die Gleichung

$$\sigma = \epsilon \cdot E \quad (1)$$

Bei einer stationär arbeitenden, d.h. passierhaltig druckenden Rollenrotationsmaschine gilt, weil sich ja nichts ändern darf, die Kontinuitätsgleichung streng. Das heißt, daß der Papierfluß an jeder beliebigen Stelle konstant ist. Es gilt also beispielsweise für die kleinen Bahnabschnitte in den Drucklinien

$$g'_1 \cdot v'_1 \cdot A'_1 = g'_x \cdot v'_x \cdot A'_x = \text{konst.} \quad (2)$$

In dieser Gleichung ist g eine Dichte, v eine Geschwindigkeit und A eine Querschnittsfläche. Die mit 1 indizierten Größen sollen sich auf das erste Druckwerk beziehen, während die mit x indizierten Größen sich auf irgendeines der folgenden Druckwerke beziehen sollen (Abb. 1).

Man kann die Gl. (2) vereinfachen, wenn man daran denkt, daß Papier ein Faservlies ist, bei dem die Dehnung durch Ausrichten der Fasern erfolgt, so daß die tragenden Quer-

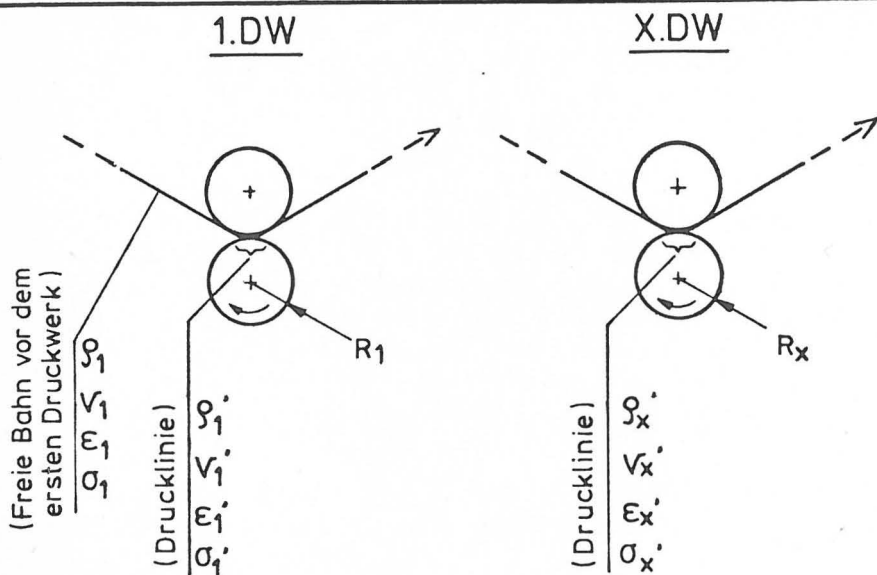


Abb. 1: Für den Bahnlauf bezeichnende Größen

schnitte sich praktisch nicht verändern. Die Querschnittsflächen können deshalb alle als gleich betrachtet werden. Die örtlichen Dichten sind deshalb nur von den örtlichen Dehnungen abhängig. Damit kann man die Gl. (2) neu schreiben als

$$\frac{v_1'}{1+\epsilon_1} = \frac{v_x'}{1+\epsilon_x} = \text{konst.} \quad (3)$$

Die Bahngeschwindigkeiten v_1' bzw. v_x' in den Drucklinien werden wegen der Haftung der Bahn an den farbübertragenden Oberflächen von deren voraussetzungsgemäß konstanten Geschwindigkeiten bestimmt. Sie sind als Systemkonstante zu betrachten. Es gilt für den stationären, passierhaltigen Druck deshalb auch

$$\epsilon_1' = \text{konst.} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_x' = \text{konst.} \quad (4.2)$$

Mit dem Hooke'schen Ansatz Gl. (1) wird daraus

$$\epsilon_1' = \frac{\sigma_1'}{E} = \text{konst.} \quad (5.1)$$

$$\epsilon_x' = \frac{\sigma_x'}{E} = \text{konst.} \quad (5.2)$$

Ausgehend von der Bedingung $\epsilon_1' = \frac{\sigma_1'}{E} = \text{konst.}$ Gl. (5.2) fragen wir nun nach den Bedingungen, welche an die freie Bahn vor dem ersten Druckwerk gestellt werden müssen. Es sei dort die Bahndehnung ϵ_1 , die Bahnspannung σ_1 , die Bahngeschwindigkeit v_1 und der Elastizitätsmodul E . Es ist nun bekannt (vergl. dazu Institutsbericht 2/1976 des IDD der THD), daß die Geschwindigkeit v_1 der freien Bahn vor dem ersten Druckwerk von der Geschwindigkeit v_1 der Bahn in der ersten Drucklinie abweicht, und zwar um einen "Förderabweichung" genannten Betrag

$$\phi_1 = \frac{v_1 - v_1'}{v_1'} = \frac{v_1}{v_1'} - 1 \quad (6)$$

Für den Regelfall eines inkompressiblen Presseurbelages ist $\phi_1 < 0$, d.h. die Geschwindigkeit v_1 der freien Bahn ist - wenn auch nur geringfügig - kleiner als die Bahngeschwindigkeit v_1 in der Drucklinie des folgenden Druckwerkes. Bei gegebener konstanter Maschineneinstellung ist

$$\phi_1 = \text{konst.} \quad (6.1)$$

Aus Gl. (6) und Gl. (6.1) folgt

$$v_1 = v_1' (1 + \vartheta_1) = v_1' \cdot \text{konst.} \quad (7)$$

Schreibt man nun - analog zu Gl. (3) - die Kontinuitätsgleichung wieder an, dann ergibt sich

$$\frac{v_1}{1 + \varepsilon_1} = \frac{v_1' (1 + \vartheta_1)}{1 + \varepsilon_1} = \frac{v_1'}{1 + \varepsilon_1'} \quad (8)$$

Aufgelöst nach der Dehnung in der freien Bahn vor dem ersten Druckwerk folgt daraus

$$\varepsilon_1 = (1 + \vartheta_1)(1 + \varepsilon_1') - 1 \quad (9)$$

Nach dem Ausmultiplizieren und Vernachlässigung Glieder höherer Ordnung entsteht damit

$$\varepsilon_1 = \vartheta_1 + \varepsilon_1' \quad (9.1)$$

Da die beiden Größen ϑ_1 und ε_1' im stationären, passerhaltigen Druck konstant sind, entsteht als Grundforderung mit dem Hooke'schen Ansatz

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} = \vartheta_1 + \varepsilon_1' = \text{konst.} \quad (10)$$

in Worten: Die Grundvoraussetzung für einen passerhaltigen Druck besteht in der Konstanz der Dehnung der freien Bahn vor dem ersten Druckwerk.

Wir alle wissen, daß derzeitig die Rollenabwickelungen spannungsgeregelt sind. Es wird also die Spannung σ_1 vor dem ersten Druckwerk konstant gehalten. Wir alle wissen aber auch, daß trotz dieser Maßnahme immer wieder Passerfehler auftreten. Werden in dieser Hinsicht hohe Qualitätsanforderungen gestellt, dann muß die Rollenrotationsmaschine mit einem Passerregler ausgerüstet werden.

Passerfehler entstehen dann, wenn die Drucklänge sich in einem Druckwerk ändert. Denn dann stimmt die geometrische Länge des Bahnweges zum nächsten Druckwerk nicht mehr, und das nächste Druckwerk druckt um den Bahnwegfehler verschoben, druckt also mit einem Passerfehler. Der Passerregler korrigiert dann diesen Fehler durch Anpassung der Bahnweglänge oder durch Verdrehen des nachfolgenden Zylinders.

Die den Passerfehler erzeugende Drucklängenänderung selbst kann nur dann entstehen, wenn die Dehnung ε_1 der Bahn in der ersten Drucklinie als Folge einer Änderung der Dehnung ε_1 vor dem ersten Druckwerk sich verändert. Nach Gl. (10) bedeutet dies, da $\phi_1 = \text{konst}$ und bei Spannungsregelung auch $\sigma_1 = \text{konst}$ ist, daß Änderungen des Elastizitätsmoduls E für Passerfehler verantwortlich sein müssen.

Der Elastizitätsmodul einer Papierbahn ist in der Tat keine ortsunabhängige Konstante, sondern hängt im wesentlichen ab von der örtlichen flächenbezogenen Masse, von den örtlichen Massenverhältnissen zwischen Fasern, Füllstoff und Strich und vom örtlichen Feuchtgehalt. Vor langer Zeit schon wurde zudem erkannt, daß der Elastizitätsmodul der äußeren Wickellagen höher ist als jener der inneren Lagen und zwar abhängig von der Wickelart und der Lagerungsdauer der Rolle. Die Abweichung kann 15 % übersteigen. Papiermacher vermuten zudem, daß unabhängig davon Elastizitätsmodulschwankungen innerhalb der Rolle von bis zu 10 % auftreten können. Genaue Angaben sind allerdings nicht erhältlich.

Man kann zwar im allgemeinen davon ausgehen, daß Passerregler die letztgenannten Abweichungen ausreichend genau ausregeln können. Alle Passerregler versagen jedoch, wenn sie die sprunghafte Änderung des Elastizitätsmoduls beim Spleißen der inneren Lage der alten Rolle mit der äußeren Lage der neuen Rolle ausregeln müssen. Ein Grund für dieses Versagen liegt nicht zuletzt darin, daß Passerregler erst

dann reagieren können, wenn das Unglück, d.h. der Passerfehler sich bereits entwickelt hat. Passerregler versuchen Symptome zu korrigieren, nicht jedoch die Ursache, nämlich die Dehnungsänderung als Folge der Elastizitätsmoduländerung. Abhilfe kann in der Tat nur die Regelung auf konstante Dehnung ε_1 schaffen. Damit sich auch bei dieser Art der Regelung kein merklicher Passerfehler ausbilden kann, müßte die Reglertotzeit möglichst klein gehalten werden. Es müßte deshalb der Ist-Wert der Dehnung ε_1 bereits vor dem ersten Druckwerk laufend gemessen, mit dem Soll-Wert verglichen und geregelt werden. Die durch einen Dehnungsregler hier mutmaßlich erreichbaren Vorteile würden natürlich auch bei Änderungen des Elastizitätsmodules innerhalb einer Rolle voll durchschlagen und könnten in gewissen Fällen vielleicht sogar Passerregler entbehrlich machen.

Es gibt jedoch noch einen zweiten, bei hohen Qualitätsanforderungen ebenso wichtigen Grund, um von der Spannungsregelung auf die Dehnungsregelung überzugehen.

Es ist bekannt, wenngleich nicht allen geläufig, daß neben Passerfehlern, welche tendenziell verlaufen, insbesondere im Tiefdruck auch Passerfehler festgestellt werden, welche sprunghaft verlaufen, also stochastisch auftreten (Technische Mitteilungen AEG-Telefunken 58 (1959)8). Die theoretische Begründung für diese stochastischen Passerfehler findet man, wenn man berücksichtigt, daß nicht nur unmittelbar in den Drucklinien, sondern auch davor und danach, z.B. durch Umschlingung des Presseurs, Kräfte in die laufende Bahn eingeführt werden, welche die Dehnungen ε'_1 und ε'_x in den Drucklinien aller Druckwerke mitbestimmen.

Berücksichtigt man diesen Kräfteeinfluß beim Aufstellen der Kontinuitätsgleichung, welche bei passerhaltigem Druck ja streng erfüllt sein muß, dann erhält man nach Einführen der Radien R_1 und R_x der druckenden Zylinder in die Kontinuitätsgleichung als Resultat den Zusammenhang

$$\frac{R_x}{R_1} = f(\varepsilon_1) \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon_1 = f\left(\frac{R_x}{R_1}\right) \quad (11)$$

Die diesbezüglichen theoretischen Zusammenhänge sind im früher erwähnten Institutsbericht 2/1976 näher erläutert.

Da die Radien der druckenden Zylinder in der laufenden Maschine sicher Konstanten sind, erhält man aus der Gl. (11) als zusätzliches Ergebnis die Aussage, daß die Dehnung vor dem ersten Druckwerk nicht jeden beliebigen konstanten Wert annehmen darf, sondern daß die für die Passerhaltigkeit notwendige konstante Dehnung ε_1 nur einen bestimmten, von den Zylindern und der Bahnlaufgeometrie abhängigen Wert annehmen darf. Der Drucker könnte also nicht jede beliebige Dehnung ε_1 einstellen. (Es ist im übrigen bekannt, daß bei dem dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Spannungsregler der Drucker auch nicht jede beliebige Spannung σ_1 einstellen darf, sondern diese so einstellen muß, daß für den häufigst auftretenden Elastizitätsmodul die richtige Dehnung ε_1 auftritt. Treten stärkere Änderungen des Elastizitätsmodules auf, dann muß er eine neue Spannung σ_1 suchen, welche wieder den richtigen Wert ε_1 ergibt.) Bei Verletzung dieser Regel, d.h. bei Verletzung der Kontinuitätsbedingungen, wird der Bahnlauf instationär, also unruhig, was sich in der Praxis leicht beobachten läßt, und es müssen deshalb Passerfehler auftreten. Wird jedoch die falsche Dehnung ε_1 konstant gehalten, dann entsteht kein tendenzieller Passerfehler, sondern ein Passerfehler der stochastisch um die Null-Lage springt. Die Größenordnung dieser Passerfehler kann erfahrungsgemäß recht beträchtlich sein und weit außerhalb der zulässigen Passertoleranz liegen. Passerregler sprechen auf diese Art Passerfehler naturgemäß nicht an. Deshalb müssen stochastische Passerfehler vermieden werden, und zwar erstens durch Wahl der richtigen Dehnung ε_1 vor dem ersten Druckwerk und zweitens durch Konstanthalten dieser

Klemmstelle

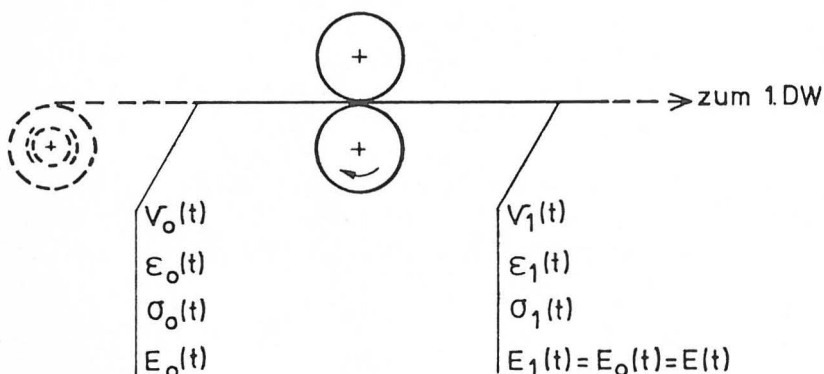


Abb. 2: Klemmstelle zwischen Abwickel­einheit und 1. Druckwerk

richtigen Dehnung. Hier liegt der zweite Grund, welcher dafür spricht, die Bahnspannungsregelung durch eine Bahn­dehnungsregelung zu ersetzen.

Im folgenden soll auf das Grundproblem der Dehnungsrege­lung eingegangen werden. Dieses entsteht dadurch, daß die Bahn­dehnung ϵ_1 vor dem ersten Druckwerk in der lauf­enden Bahn gemessen werden muß, damit die Regeltotzeit ausreichend kurz wird. Betrachtet man eine beliebige Stelle in diesem Bahnabschnitt, dann gilt dort in jedem Zeitpunkt der Hook'sche Ansatz

$$\epsilon_1(t) = \frac{\sigma_1(t)}{E(t)} \quad (12)$$

Von den drei Größen in Gl. (11) kann die Spannung $\sigma_1(t)$ direkt gemessen werden. Die beiden anderen Größen entzie­hen sich jedoch - allen raffinierten Vorschlägen zum Trotz -

der direkten Messung. Es liegt also eine Gleichung mit zwei Unbekannten, nämlich $E(t)$ und $\varepsilon_1(t)$, vor. Um sie zu lösen braucht man eine zweite Gleichung. Man erhält eine solche, wenn man für zwei Stellen z.B. eine Stelle 0 und eine danach liegende Stelle 1 im Bahnabschnitt zwischen Abwickelheit und erstem Druckwerk den Hooke'schen Ansatz anschreibt. Dabei nehmen wir an, daß die beiden betrachteten Stellen so nahe zusammenliegen, daß wir annehmen dürfen, daß durchlaufende Änderungen des Elastizitätsmodules sich nicht auswirken, also $E_0(t) = E_1(t) = E(t)$ gesetzt werden darf. Wir erhalten dann die beiden Gleichungen

$$\varepsilon_0(t) = \frac{\sigma_0(t)}{E(t)} \quad (13)$$

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1(t)}{E(t)} \quad (12)$$

Dieses Gleichungssystem ist nur dann nicht trivial, wenn $\varepsilon_1(t) \neq \varepsilon_0(t)$ bzw. $\sigma_1(t) \neq \sigma_0(t)$ ist. Diese Ungleichheit kann man erzwingen, indem man zwischen den beiden betrachteten Stellen der Bahn eine Kraft einführt, welche eine Dehnungs- bzw. Spannungsänderung erzeugt. Man muß also zwischen die beiden betrachteten Stellen eine angetriebene Zugwalze mit Presseur, also eine sogenannt Klemmstelle anordnen (Abb. 2). Da nun die Bahngeschwindigkeiten $v_0(t)$ und $v_1(t)$ vor und nach der Klemmstelle auch ungleich sind, darf man analog zu Gl. (3) die Kontinuitätsgleichung anschreiben, nämlich

$$\frac{v_0(t)}{1+\varepsilon_0(t)} = \frac{v_1(t)}{1+\varepsilon_1(t)} \quad (14)$$

Werden die Dehnungen mittels Gl. (12) und (13) eliminiert und die Gleichung neu geordnet, dann erhält man

$$\frac{v_1(t)}{v_0(t)} = \frac{E(t) + \sigma_1(t)}{E(t) + \sigma_0(t)} \quad (15)$$

Wir erinnern uns daran, daß eine der beiden Unbekannten in der Gl. (11) der Elastizitätsmodul war und lösen die Gl. (14) danach auf. Dabei erhalten wir

$$E(t) = \frac{\sigma_1(t) - \sigma_0(t) \frac{v_1(t)}{v_0(t)}}{\frac{v_1(t)}{v_0(t)} - 1} \quad (16)$$

und damit aus Gl. (12) die gesuchte Regelgröße

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\frac{v_1(t)}{v_0(t)} - 1}{1 - \frac{\sigma_0(t)}{\sigma_1(t)} \frac{v_1(t)}{v_0(t)}} \quad (17)$$

Der Elastizitätsmodul $E(t)$ und daraus die Dehnung $\varepsilon_1(t)$ vor dem ersten Druckwerk kann also dank der Einführung einer Klemmstelle bestimmt werden, allerdings unter der Voraussetzung, daß nun neben den leicht zu messenden Spannungen auch die Bahngeschwindigkeiten vor und nach der zusätzlichen Klemmstelle der Messung zugänglich gemacht werden können.

Zur Abschätzung der Genauigkeitsforderung an die Geschwindigkeitsmessung seien folgende Annahmen gemacht. Der Soll-Wert und damit näherungsweise der Ist-Wert der Dehnung soll $\varepsilon_1 = 0,001 \approx \varepsilon_1(t)$ sein. Die Spannung $\sigma_0(t)$ soll merklich kleiner als die Spannung $\sigma_1(t)$ sein, damit die von der Rolle ausgehenden höherfrequenten Störungen mög-

lichst gut gedämpft werden. Beispielsweise

$$\text{sei} \quad \frac{\sigma_0(t)}{\sigma_1(t)} = 0,5.$$

Damit ergibt sich für das Geschwindigkeitsverhältnis

$$\frac{v_1(t)}{v_0(t)} = 1 + \frac{v_1(t) - v_0(t)}{v_0(t)} \approx 1,005$$

Man kann nun leicht erkennen, daß die beiden Geschwindigkeiten bzw. die Geschwindigkeitsdifferenz mit einer Genauigkeit besser als 10^{-4} gemessen werden müssen, um eine ausreichend genaue Bahndehnungsbestimmung zu erreichen. Bislang war keine Methode bekannt, welche dieses Meßproblem - wenn überhaupt - mit erträglichem Kostenaufwand hätte lösen können. Dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren ist es jedoch im Zusammenhang mit einem noch laufenden Vorhaben gelungen, eine hochgenaue, jedoch kostengünstige Methode zur Messung der Abweichung der Drehwinkel zwei rotierender Zylinder zu finden. Damit sollte es nun möglich sein, auch die in Gl. (18) auftretende maßgebliche Geschwindigkeitsdifferenz ausreichend genau zu messen.

Aufgrund dieser Sachlage hat die Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. das Darmstädter Institut beauftragt, ein Forschungsvorhaben, das am 1.1.1982 beginnen soll, zu planen. Ziel dieses Vorhabens soll die Ausentwicklung der Methode der Bahndehnungsmessung und der Bahndehnungsregelung und ihre Überprüfung sein. Das Ergebnis soll den Mitgliedern der Forschungsgesellschaft praktisch verwertbare Unterlagen für die Entwicklung und Konstruktion von dehnungsgeregelten Abwickelungen geben und damit einen praxisgerichteten Beitrag zur Weiterentwicklung der Rollen-Rotationsmaschinen liefern.

Zusammenfassung

Es wurden die physikalisch-drucktechnischen Zusammenhänge dargelegt, welche zu der für die Praxis bedeutsamen Forderung führen, die allgemein übliche Bahnspannungsregelung in Rollen-Rotationsdruckmaschinen für hohe Qualitätsforderungen durch eine Bahndehnungsregelung zu ersetzen. Es wurde im weiteren auf die Problemlösung und die dabei zu überwindenden Schwierigkeiten eingegangen und eine Lösungsmöglichkeit erwähnt, welche zur Planung eines Forschungsvorhabens zur Entwicklung einer Einrichtung zur Bahndehnungsmessung und -regelung führte.